

ВЕСЦІ НАЦЫЯНАЛЬНАЙ АКАДЭМІІ НАВУК БЕЛАРУСІ № 2 2016  
СЕРЫЯ АГРАРНЫХ НАВУК

---

**МЕХАНИЗАЦЫЯ І ЭНЕРГЕТЫКА**

УДК 631.352

*Н. Г. БАКАЧ, И. Е. МАЖУГИН*

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ УЧЕТА ВЛИЯНИЯ КОЛЕБАНИЙ НОЖЕЙ КОСИЛКИ  
ДЛЯ УХОДА ЗА ЛУГОПАСТБИЩНЫМИ УГОДЬЯМИ НА ЕЕ РАБОТОСПОСОБНОСТЬ**

*Научно-практический центр НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства, Минск, Беларусь,  
e-mail: belagromech@tut.by*

В статье изложены результаты теоретического обоснования влияния колебания ножей лугопастбищной косилки на ее работу. Приведен анализ теоретических исследований процесса ротационного срезания растительности. Получена анимационная модель поведения ножей на стадии разгона ротора, которая подтвердила теоретическое описание процесса.

*Ключевые слова:* косилка, колебания ножей, лугопастбищные угодья.

*N. G. BAKACH, I. E. MAZHUHIN*

**THEORETICAL ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF MOVEMENT OF GRASSLAND MOWER BLADES  
ON ITS PERFORMANCE**

*The Research and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Agriculture Mechanization, Minsk, Belarus, e-mail: belagromech@tut.by*

The paper demonstrates the results of the theoretical substantiation of the movement of mower blades on its performance. The analysis of the research of a rotary cut of the green is presented. Obtained is the model of blades behavior at the stage of rotary acceleration which proves the theoretical description of the process.

*Keywords:* mower, movements of blades, grasslands.

Одним из способов ухода за лугопастбищными угодьями с целью подавления роста сорной растительности является использование скошенной травяной массы для мульчирования обрабатываемой площади. При этом способе травы срезаются, измельчаются и распределяются на окашиваемой площади, создавая мульчирующий слой, который впоследствии разлагается и переходит в объем почвы [1, 2]. Для реализации данного способа выпускаются различные косилки, совмещающие процесс скашивания и измельчения растительности, где наибольшее распространение получили прицепные роторные косилки-измельчители с осью вращения роторов, перпендикулярной к окашиваемой поверхности, и с ножами, шарнирно прикрепляемыми к несущей части ротора [3].

Особенностями косилок такого типа являются высокие скорости вращения режуще-измельчающего аппарата, большие размеры и масса ножей, а также обусловленная этим их большая сила инерции. Это приводит к тому, что при разгоне роторов от состояния покоя до требуемой окружной скорости ножи отклоняются от радиального положения, а затем начинают совершать колебания, постепенно приходя к положению, близкому к радиальному. Колебания ножей неизбежны и в процессе скашивания растительности, так как ножи периодически входят в зону срезаемой растительности, а затем выходят из нее. Отклонения и колебания ножей сказываются на работе косилки, что требует проведения теоретического анализа данного явления.

Процессу ротационного срезания растительности посвящен ряд работ, однако в большинстве исследований рассматривались дисковые рабочие органы с жестко закрепленными сегментными

ножами. В. Н. Кондратьев [4] исследовал косилку-измельчитель барабанного типа для окашивания откосов мелиоративных объектов. Исследования, выполненные в УО «БГСХА» [5], посвящены в основном скашиванию древесно-кустарниковой растительности на мелиоративных объектах, многороторной косилкой, оснащенной трапецевидными ножами. Проблему учета колебания ножей при работе многороторной косилки с шарнирно прикрепленными ножами изучал А. А. Воеводин [6], который рассматривал косилку с ножами малых размеров на скашивании наклонных поверхностей мелиоративных объектов.

РУП «Научно-практический центр НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства» ранее выполнено теоретическое обоснование параметров косилки и режущей части ножей [7], но без учета процесса колебания ножей.

Из проведенного анализа можно сделать вывод о том, что исследования в основном проводились по режущим аппаратам с жестко закрепленными ножами, которые не учитывают специфических условий, работы лугопастбищных мульчирующих роторных косилок. Поэтому актуальной задачей является теоретический анализ кинематических параметров косилки, в частности, обоснование одного из важнейших параметров – величины перекрытия траекторий концов ножей.

Исследования выполняли путем теоретического анализа процесса колебания ножей косилки. Проверка теоретических положений была реализована путем проведения компьютерного эксперимента, спланированного с использованием стандартной программы ANSYS.v3, позволяющей получить анимационную интерпретацию поведения ножей на стадии разгона ротора.

Технологический процесс работы роторной косилки заключается в том, что на стадии разгона ротора, после включения ВОМ трактора и приведения во вращение несущей части, ножи под действием сил инерции отклоняются назад по ходу вращения. Приводить ножи во взаимодействие со срезаемой растительностью до достижения ими положения, близкого к радиальному, нельзя, поэтому важно определить длительность фазы разгона ножей.

В фазе разгона роторов от состояния покоя до скорости  $v_p$  в начальный момент, вследствие возникающих сил инерции, ножи отклоняются от радиального положения на угол, близкий к  $90^\circ$ , затем ножи под действием центробежных сил начинают совершать колебания в плоскости своего вращения, причем вследствие сопротивления воздуха и трения в шарнире колебания будут затухающими. К радиальному положению нож стремится вернуться под действием момента, создаваемого центробежной силой, и прямо пропорционального величине плеча  $h$  действия центробежной силы, приложенной в центре масс, относительно оси колебания ножа.

Для математического описания процесса колебаний математического маятника вводим [8] коэффициент пропорциональности  $\omega^2$ , восстанавливающую силу – произведение  $\omega^2 h$ , и коэффициент восстановления –  $\omega$ . Силу сопротивления маятнику положим пропорциональной скорости его колебательного движения. Она направлена в сторону, противоположную движению маятника, и определяется как  $2kh$  (здесь  $2k$  – коэффициент пропорциональности, а  $k$  – коэффициент сопротивления). При отсутствии срезания растительности внешней возмущающей силы нет, и колебания рассматриваем как свободные.

Свободные колебания описываются следующим дифференциальным уравнением

$$\ddot{h} + 2k\dot{h} + \omega^2 h = 0. \quad (1)$$

Его характеристическим уравнением является следующее:

$$r^2 + 2kr + \omega^2 = 0. \quad (2)$$

Можно считать, что при холостом вращении коэффициент сопротивления меньше коэффициента восстановления, т. е.  $k < \omega$ . В этом случае ножи совершают затухающие гармонические колебания. Решением дифференциального уравнения будет

$$h = e^{-kt} (C_1 \cos(k_1 t) + C_2 \sin(k_1 t)), \quad (3)$$

где  $t$  – время от начала процесса;  $C_1$  и  $C_2$  – постоянные коэффициенты;  $k_1$  – коэффициент, определяемый по формуле

$$k_1 = \sqrt{\omega^2 - k^2}. \quad (4)$$

Совершив рекомендуемые [8] преобразования, окончательно получим

$$h = Ae^{-kt} \sin(k_1 t + \varphi_0), \quad (5)$$

где  $A$  и  $\varphi_0$  – произвольные постоянные, зависящие от начальной скорости возврата и начального отклонения маятника.

Выражение  $Ae^{-kt}$  является амплитудой колебаний. Она не является величиной постоянной, а стремится к нулю при  $t \rightarrow \infty$ . Таким образом, нож будет колебаться вокруг присоединительного элемента относительно радиального положения с постепенно затухающими амплитудами (по экспоненциальному закону). При этом  $k_1$  будет частотой колебаний,  $\varphi_0$  – начальной фазой или начальным углом отклонения ножа от радиального положения.

Логарифм амплитуды убывает с постоянной скоростью  $k$ . Для того чтобы найти максимальное значение отклонения  $h$ , возьмем ее производную:

$$\dot{h} = -Ae^{-kt} \cos(k_1 t + \varphi_0) + Ae^{-kt} \sin(k_1 t + \varphi_0). \quad (6)$$

В крайних положениях, соответствующих амплитуде, скорость ножа в процессе его колебания равна нулю. Приравняв полученное уравнение (6) к нулю, получим выражение для определения экстремальных значений  $t$ :

$$\operatorname{tg}(k_1 t + \varphi_0) = k_1 / k. \quad (7)$$

С учетом знака максимумы и минимумы отклонений будут чередоваться и следовать через полупериод  $T/2 = \pi/k_1$ . Если обозначить время, по истечении которого от начала процесса отклонение достигнет максимума, через  $t_0$ , то отношение  $\Delta$  двух последовательных максимумов отклонений будет равно

$$\Delta = \frac{Ae^{-kt_0}}{Ae^{-k(t_0+T)}} = e^{kT}. \quad (8)$$

Постоянная величина  $\ln \Delta = kT$  является логарифмическим декрементом затухания.

Практически из приведенного анализа можно, задавшись допустимой величиной отклонения ножа, т.е. амплитудой колебаний и рассчитав период колебаний, определить необходимое время разгона ротора, по истечении которого может начинаться процесс скашивания.

Период колебаний  $T$  математического маятника определяется [9] по формуле

$$T = 2\pi\sqrt{l/g}, \quad (9)$$

где  $l$  – расстояние от точки, относительно которой совершаются колебания, до центра масс колеблющегося тела.

В связи с тем, что нож приближенно представляет собой протяженную прямоугольную пластину, его в данном случае можно рассматривать как физический маятник.

Период колебаний  $T$  физического маятника при его колебании вокруг горизонтальной оси в поле сил тяжести определяется по формуле

$$T = 2\pi\sqrt{I/mgr_{\text{ц}}}, \quad (10)$$

( $I$  – момент инерции ножа,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ).

В нашем случае нож колеблется вокруг вертикальной оси в поле центробежных сил. Заменяв ускорение свободного падения центробежным ускорением, можно записать

$$T = 2\pi\sqrt{I/(m\omega_p^2 R_{\text{ц}} r_{\text{ц}})}. \quad (11)$$

Упрощенно нож можно представить параллелепипедом длиной  $r_2$ , толщиной  $s$  и шириной  $b_{\text{н}}$ . Для такой фигуры расчет момента инерции можно сделать по формуле Штайнера. Момент инерции относительно центра болта крепления ножа, т.е. относительно оси колебаний, может быть определен для ножа прямоугольной формы следующим образом:

$$I = \frac{m(r_2^2 + b_{\text{н}}^2)}{12} + mr_{\text{ц}}^2. \quad (12)$$

Подставив выражение для расчета  $I$  в формулу (11), после некоторых упрощений получим

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{r_2^2 + b_n^2 + 12r_n^2}{12\omega_p^2 R_n r_2}}. \quad (13)$$

Имея в виду, что для параллелепипеда можно принять  $r_n = 0,5r_2$  и, кроме того, при небольшой амплитуде  $R_n = r_1 + 0,5r_2$ , из уравнения (13) после подстановки и некоторых упрощений получим

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{4r_2^2 + b_n^2}{6\omega_p^2 r_2 (r_1 + 0,25r_2)}}. \quad (14)$$

Проверка теоретических положений по изучению процесса колебания ножей на стадии разгона роторов была реализована путем осуществления компьютерного эксперимента, спланированного с использованием стандартной программы ANSYS.v3. Программа составлена для ротора с ранее определенными параметрами и для частоты вращения ВОМ трактора  $-1000 \text{ мин}^{-1}$ .

В результате получена анимационная картина поведения ножей при разгоне ротора. На (рис. 1) представлены характерные положения ножей на роторе в процессе его разгона.

Рис. 1. Характерные положения ножей на роторе в процессе его разгона:  
1 – момент начала вращения, ножи отклонены от радиального положения на угол около  $90^\circ$ ;  
2 – ротор повернулся на угол около  $90^\circ$ , ножи перемещаются к радиальному положению;  
3 – дальнейший поворот ротора и перемещение ножей;  
4 – продолжающийся поворот ротора и переход ножей за радиальное положение;  
5 – отклонение ножей в противоположное крайнее положение;  
6 – ротор совершил примерно один полный оборот, ножи отклоняются в обратном направлении

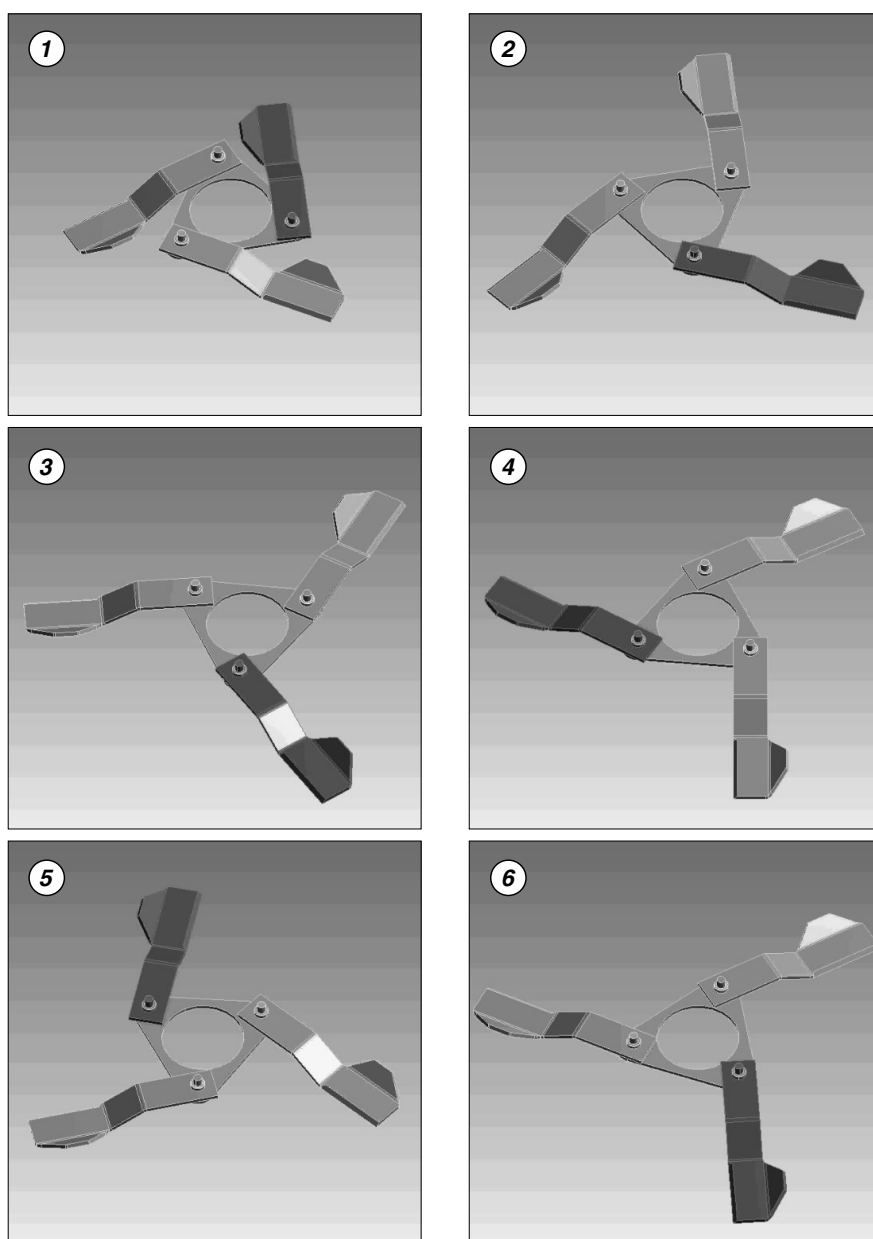


Рис. 1 подтверждает теоретическое описание процесса. Анализ процесса затухающих колебаний показывает, что через 2 с после включения ВОМ трактора колебания ножей практически прекращаются.

Таким образом, практической рекомендацией является то, что перед началом скашивания растительности необходимо в течение не менее 2 с на холостом ходу выполнить разгон ротора.

При скашивании растительности ножи периодически начинают срезать растительность, т. е. входят в зону резания, а затем выходят из нее. Войдя в зону резания, нож под действием сопротивления срезаемой растительности начинает отклоняться назад от радиального положения. Выйдя из зоны резания (рис. 2, а), нож начинает поворачиваться относительно вращающейся несущей части ротора, приближаясь к радиальному положению. При входе в зону резания вектор скорости поворота периферийного конца ножа должен быть направлен в сторону вектора скорости рабочего перемещения косилки, или более строго – применительно к (рис. 2, а) – проекция вектора скорости поворота периферийного конца ножа на горизонтальную ось должна быть направлена в сторону вектора скорости рабочего перемещения.

Нож, участвуя во вращательном (переносном) движении, совершает одновременно относительное движение, колеблясь вокруг своей оси. За полный период колебаний он переместится из положения 1 в положение 2, и обратно. Выполнение изложенного выше условия относительно соотношения векторов скоростей может быть обеспечено при определенных кинематических и геометрических соотношениях ротора. Для иллюстрации порядка поиска нужных соотношений выполним расчеты для ротора радиусом  $R = 0,75$  м. Ширина ножа ротора составляет около  $0,2r_2$ . С учетом этого формулу (14) приведем к следующему виду:

$$T = 2 \frac{\pi}{\omega_p} \sqrt{\frac{4,04r_2}{6(r_1 + 0,5r_2)}}. \quad (15)$$

Время поворота ротора на угол  $\varphi_{\text{пов}}$ , соответствующий повороту от момента выхода ножа из зоны резания до его входа в нее, составляет  $\omega_{\text{пов}}/\omega_p$ , где  $\omega_p$  – угловая скорость ротора рад/с, соответствующая окружной скорости концов ножей.

Для определения  $\varphi_{\text{пов}}$  приведем следующую схему (рис. 2, б).

Согласно приведенной схеме,

$$\varphi_{\text{пов}} = \pi + \theta + \beta. \quad (16)$$

Здесь

$$\beta = \arccos \left[ \left( R - \frac{l_n}{2} \right) / R \right]. \quad (17)$$

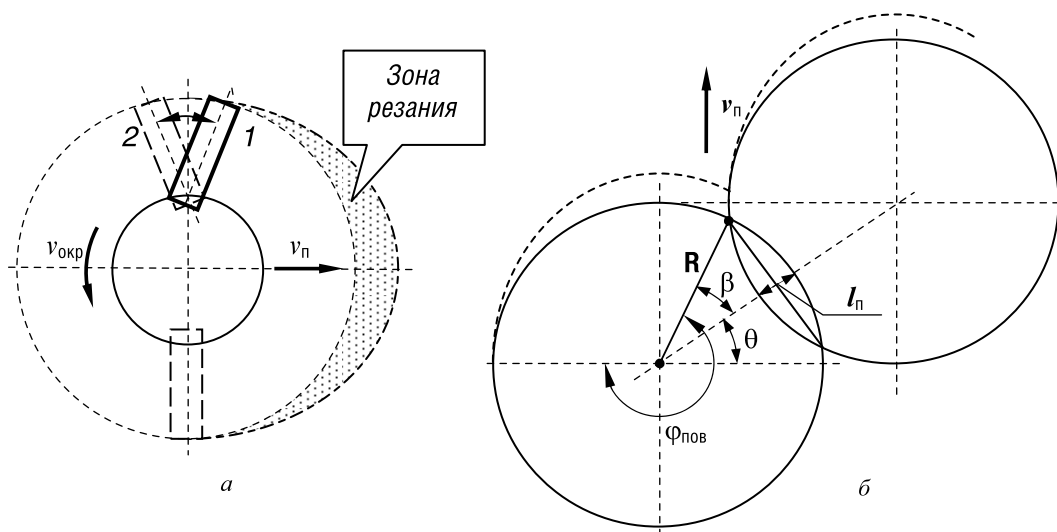


Рис. 2. Расчетные схемы к анализу колебания ножей: а – схема колебания ножей; б – схема к определению угла  $\varphi_{\text{пов}}$ , на котором нож не производит срезание растительности

Приравняв время поворота ротора на угол  $\varphi_{\text{пов}}$  ко времени некоторой доли  $f$  периода колебаний ножа, получим следующее равенство:

$$\frac{\varphi_{\text{пов}}}{\omega_p} = f \frac{2\pi}{\omega_p} \sqrt{\frac{4,04r_2}{6(r_1 + 0,5r_2)}}. \quad (18)$$

При измерении  $\varphi_{\text{пов}}$  в радианах можно записать  $\varphi_{\text{пов}} = k_\varphi \pi$  ( $k_\varphi$  – коэффициент перевода угла  $\varphi_{\text{пов}}$  для его измерения в долях  $\pi$ ). Тогда из равенства (18) получим

$$k_\varphi = f \sqrt{\frac{8,08r_2}{3r_1 + 1,5r_2}}. \quad (19)$$

Для ротора с принятыми параметрами и при условии, что величина перекрытия составляет 0,1 м, по формуле (17) получим  $\beta = 21^\circ$ , или  $0,117\pi$ . У подобных косилок угол  $\theta$  близок к  $30^\circ$ , или  $0,167\pi$ . Тогда получим по формуле (16)  $\varphi_{\text{пов}} = 1,284\pi$ , т. е.  $k_\varphi = 1,284$ . Подставив полученное значение  $k_\varphi$  в уравнение (19) и проведя некоторые преобразования, получим следующее выражение:

$$k_\varphi^2 = 8,08f^2r_2 / (3r_1 + 1,5r_2). \quad (20)$$

Отсюда

$$r_2 = 3k_\varphi^2r_1 / (8,08f^2 - 1,5k_\varphi^2). \quad (21)$$

Найдя по формуле (21)  $r_2$  как  $k_\varphi r_1$ , значение  $r_1$  определим с учетом того, что  $R = r_1 + r_2$ , по формуле

$$r_1 = R / (1 + k_\varphi). \quad (22)$$

Произведя соответствующие вычисления для  $R = 750$  мм и  $k_\varphi = 1,284$ , по данным которых с использованием программы Excel построим график (рис. 3).

Центральный ротор срезание растительности производит на угле, близком к  $\pi$ . В этом случае  $k_\varphi = 1$ , что для центрального ротора учтено в расчетной формуле (22).

С точки зрения сложения скоростей окружной, поступательной и скорости поворота ножа в момент его вхождения в зону резания наилучшими параметрами ротора являются такие, которые обеспечивают для этого момента максимальную скорость поворота ножа. Максимальная скорость поворота достигается при повороте ножа на 0,25 периода его колебаний. Но, как показывают расчеты, значение  $r_1$  в таком случае должно быть отрицательным, что осуществить технически не представляется возможным.

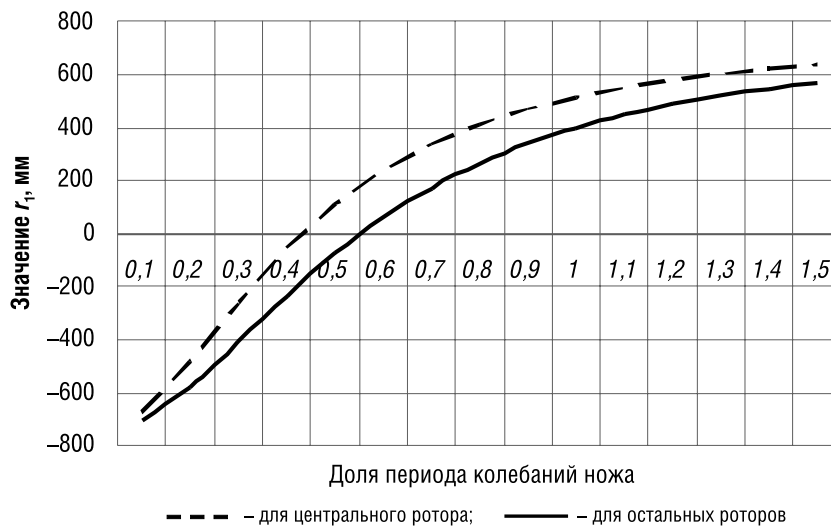


Рис. 3. График к определению значения  $r_1$

Допустимым можно считать положение ножа в процессе его колебаний, при котором нож в момент его вхождения в зону резания будет иметь нулевую скорость поворота. Это соответствует его повороту на половину периода. На рис. 3 видно, что в таком положении значение  $r_1$



для боковых роторов остается отрицательным, а для центрального может иметь небольшое (до 100 мм) положительное значение. Это также нельзя считать приемлемым. Если рассматривать следующий период колебаний, т. е. значение доли периода, превышающей единицу, то можно заметить, что значение  $r_1$  в таком случае должно быть более 400 мм для боковых роторов и более 500 мм – для центрального. Таким образом, теоретический анализ показывает, что для косилки, у которой ножи должны быть достаточно длинными и тяжелыми, обеспечить кинематически благоприятное соотношение между  $r_1$  и  $r_2$  не представляется возможным, поэтому следует оптимизировать параметры по допустимым значениям перекрытия траекторий концов ножей и максимальной силе воздействия ножей на растительность.

### Выводы

1. Особенности конструкции лугопастбищной косилки требуют проведения теоретического анализа учета влияния колебания ножей косилки на ее работу.
2. Перед началом скашивания растительности необходимо в течение не менее 2 с на холостом ходу выполнить разгон ротора.
3. Обеспечить кинематически благоприятное соотношение между  $r_1$  и  $r_2$  не представляется возможным, поэтому следует оптимизировать параметры по допустимым значениям перекрытия траекторий концов ножей и максимальной силе воздействия ножей на растительность.

### Список использованных источников

1. Современные технологии и машины для улучшения естественных и окультуренных сенокосов и пастбищ: аналит. обзор / В.В. Азаренко [и др.]. – Минск: Беларус. ин-т внедрения новых форм хозяйствования в АПК, 2003. – 46 с.
2. Бакач, Н.Г. Механизация процессов подкашивания лугопастбищных угодий: современные технические решения / Н.Г. Бакач, А.Н. Басаревский, И.Е. Мажугин // Механизация и электрификация сельского хозяйства: межвед. темат. сб. / Науч.-практ. центр НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства. – Минск, 2012. – Вып. 46. – С. 116–122.
3. Бакач, Н.Г. Аналитический обзор конструкций косилок по уходу за лугопастбищными угодьями / Н.Г. Бакач, И.Е. Мажугин // Механизация и электрификация сельского хозяйства: межвед. темат. сб. / Науч.-практ. центр НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства. – Минск, 2011. – Вып. 45. – С. 161–166.
4. Кондратьев, В.Н. Косилки бильного типа: вопросы проектирования и эксплуатации / В.Н. Кондратьев. – Минск: РУП «БелНИИ мелиорации и луговодства», 2002. – 40 с.
5. Рубец, С.Г. Скашивание древесно-кустарниковой растительности на мелиоративных объектах многоаторной косилкой с трапецевидными ножами: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / С.Г. Рубец. – Горки, 2013. – 196 л.
6. Воеводин, А.А. Экспериментальные исследования равновесия ножей с шарнирным креплением на ротационном рабочем органе мелиоративных косилок / А.А. Воеводин // Машины для строительства и эксплуатации гидро-мелиоративных систем: сб. науч. тр. – М.: Изд. МГМИ, 1984. – С. 33–39.
7. Бакач, Н.Г. Обоснование параметров режущей части ножей косилки для ухода за лугопастбищными угодьями / Н.Г. Бакач, А.Н. Басаревский, И.Е. Мажугин // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. аграр. навук. – 2014. – № 1. – С. 87–92.
8. Бронштейн, И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев; под ред. Г. Гроше и В. Циглера, пер. с нем. – М.: Наука, 1981. – 718 с.
9. Бермант, А.Ф. Краткий курс математического анализа: учеб. пособие для втузов / А.Ф. Бермант, И.Г. Араманович. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1966. – 735 с.

Поступила в редакцию 23.11.2015